

УДК 622.692.4.058

Кутуков С.Е., Бахтизин Р.Н.

*Уфимский государственный нефтяной технический
университет*

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ГАЗОВЫХ СКОПЛЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены гидродинамические условия существования и миграции газовых скоплений. Предложена гидродинамическая модель расслоенного течения продукта в трубопроводах, позволяющая на инженерном уровне предсказывать возможное положение газового скопления в полости трубопровода. Показан один из физических аспектов влияния рельефа трассы на пропускную способность трубопровода.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации магистральных трубопроводов показывает снижение пропускной способности по сравнению с проектной. Причем, чем более недогружен участок, тем большим гидравлическим сопротивлением он обладает.

Одной из причин, снижающих пропускную способность линейной части МНП является газоздушные скопления в повышенных участках трассы, содержащие как газы неорганического происхождения (N_2 , CO_2 , H_2S , и др.), так и легкие фракции углеводородов (CH_4 , C_2H_6). Существует две точки зрения на причину образования газовых скоплений: одна из них - сепарация растворенного газа на восходящем участке трубопровода с последующей коагуляцией пузырьков в скопление газа (К.Г.Донец [1]); другая - заземление значительных объемов атмосферного воздуха в повышенных участках при заполнении участка трубопровода после ремонта или реконструкции, который не выносятся из трубы из-за малых скоростей движения нефти (А.А.Калинская [2], Л.С.Маслов [3]).

Обоснование возможности применения теории течения жидкости в открытых руслах для определения формы и размеров газового скопления, находящегося в наклонном трубопроводе за перевальной точкой можно найти уже в работах Б.А.Бахметьева, датированных 1914 г. [4].

Физическая картина потока продукта под «неподвижным» газовым скоплением весьма близка к модели безнапорного движения жидкости в цилиндрическом канале, подробно описанной в классических курсах гидромеханики [5,6,7].

Вопросом существования устойчивого расслоенного течения двухфазного потока занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Наиболее известны диаграммы, предложенные А.И.Гужовым [8], а за рубежом – Тейтелем и Даклером [9].

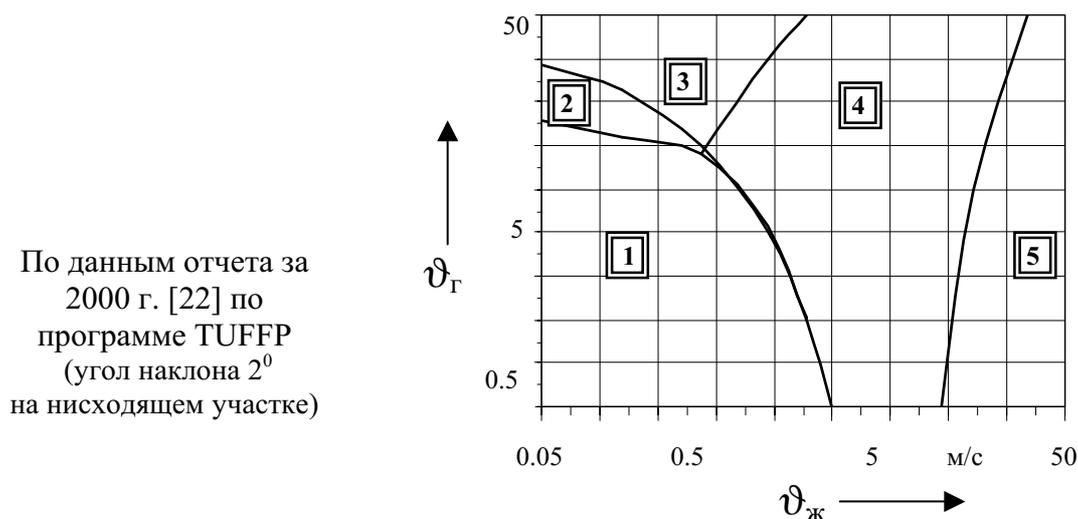


Рис.1 - Диаграмма структурных форм движения газожидкостного потока

Градация структурных форм движения газонефтяного потока у разных исследователей колеблется от 5 до 9. Модель Тейтеля-Даклера предлагает 5 [9]:

- Расслоенная (stratified) - 1;
- Расслоенная с волновой поверхностью раздела фаз (stratified wavy) - 2;
- Пробковая (intermittent) - 3;
- Кольцевая (annular) - 4;
- Эмульсионная (dispersed) -5.

А.И.Гужов различает 6 структурных форм течения, В.Ф.Медведев - 9 [8]. Но неизменно во всех исследованиях показано, что при малых скоростях газа («неподвижное» скопление) и скоростях движения жидкости 0...1,5 м/с режим движения – расслоенный.

МОДЕЛЬ РАССЛОЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ

Расчетную схему элементарного участка трубопровода, аппроксимируемого прямой с углом наклона \mathfrak{K} на профиле трассы, можно описать моделью стационарного расслоенного потока в наклонном цилиндрическом канале (рис.2).

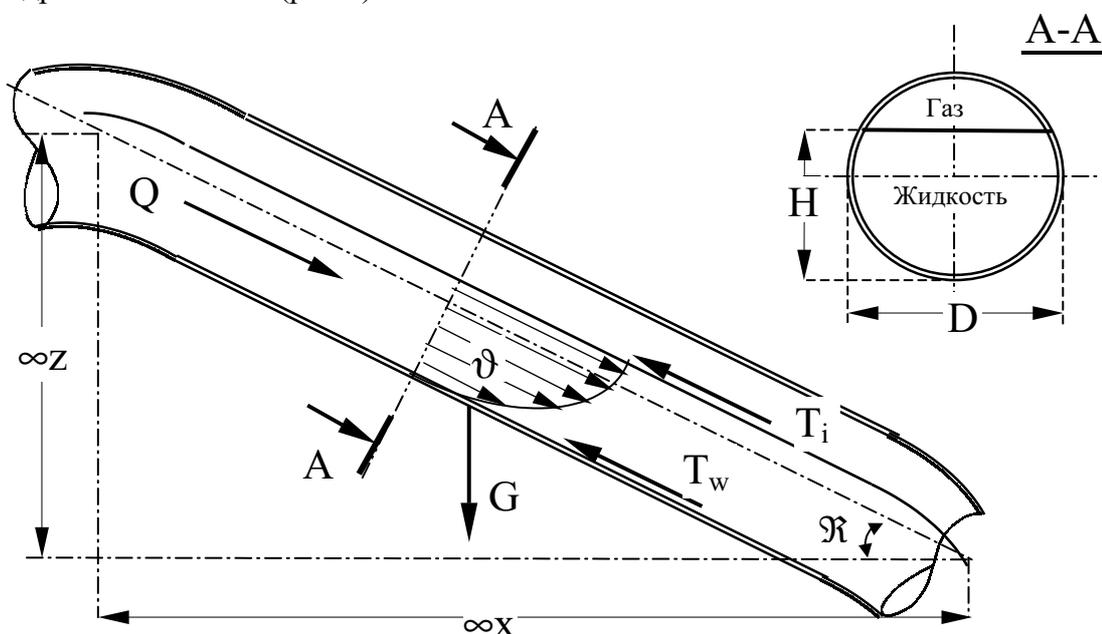


Рис.2 - Расчетная схема потока под «неподвижным» газовым скоплением

Составим для изображенного на рисунке элементарного участка уравнение Бернулли по направлению движения:

$$tg\alpha \cdot dx + \frac{p_o}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g} = dH + \frac{p_o}{\rho g} + \alpha_0 \frac{(v + dv)^2}{2g} + d h_{mp}, \quad (1)$$

где p_o – давление в газовом скоплении;

v, dv – скорость потока и ее изменение по направлению движения;

dH – приращение глубины потока;

α_0 - коэффициент Кориолиса;

dh_{mp} – потери энергии на трение.

Давление на свободной поверхности жидкости под газовым скоплением практически неизменно, поэтому пьезометрический напор в обеих частях уравнения можно сократить. Потери энергии на трение dh_{mp} имеют две составляющие: по стенке трубопровода dh_w и на поверхности раздела фаз dh_i .

$$dh_w = \frac{\rho_{жс}}{\rho_{жс} - \rho_г} \cdot \lambda \frac{\chi}{4\omega} \cdot \frac{v^2}{2g} dx, \quad (2)$$

$$dh_i = \frac{\tau_i}{\rho_{жс} - \rho_г} \cdot \frac{a}{\omega \cdot g} dx, \quad (3)$$

где $\rho_{жс}, \rho_г$ – плотность жидкости и газа;

λ - коэффициент Дарси;

χ - смоченный периметр;

ω - площадь живого сечения потока жидкости;

a – длина границы раздела фаз;

τ_i – касательное напряжение сдвига за счет сил межфазного трения.

Плотность газа $\rho_г$ на два порядка меньше плотности жидкости $\rho_{жс}$, поэтому в уравнениях (2,3) ей можно пренебречь. Представим потери энергии на межфазное трение в виде уравнения Дарси:

$$dh_i = \frac{\tau_i}{\rho_{жс} - \rho_г} \cdot \frac{a}{\omega \cdot g} dx = \frac{2 \tau_i}{\rho_{жс} v^2} \cdot \frac{a}{\omega} \cdot \frac{v^2}{2g} dx = \frac{2 \tau_i}{\pi \cdot \rho_{жс} v^2} \cdot \frac{a}{D} \cdot \frac{\omega_0}{\omega} \cdot \frac{dx}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Сравнивая уравнение (4) с уравнением Дарси приходим к выводу, что достаточно сравнить коэффициент гидравлических сопротивлений λ с

комплексом $\frac{2 \tau_i}{\pi \cdot \rho_{жс} v^2} \cdot \frac{a}{D} \cdot \frac{\omega_0}{\omega}$ для сопоставления dh_w и dh_i . По данным

Г.Е.Коробкова [11] значение межфазного касательного напряжения $\frac{\tau_i}{\rho_{жс} v^2}$

оценивается величиной 10^{-7} , вклад остальных величин порядка единицы, а коэффициент Дарси имеет порядок 10^{-2} . Следовательно, силы межфазного трения имеют величину менее 1% сил жидкостного трения о стенки трубопровода.

Принимая во внимание определение гидравлического радиуса: $R_r = \varpi / \chi$ и выражение объемного расхода $Q = \vartheta \cdot \varpi$, получим:

$$dh_w = \lambda \frac{D}{4R_c} \cdot \frac{dx}{D} \cdot \frac{\vartheta^2}{2g} = \frac{\lambda}{D \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2 2g} \cdot \left(\frac{\varpi_o}{\varpi}\right)^2 \frac{D}{4R_c} \cdot Q^2 dx =$$

$$= 0,08263 \cdot \frac{\lambda}{D^5} \cdot \left(\frac{\varpi_o}{\varpi}\right)^2 \frac{D}{4R_c} \cdot Q^2 dx$$
(5)

В анализе феномена расслоенного движения в трубопроводах рассматриваются такие геометрические характеристики живого сечения как:

Безразмерная глубина потока – $\frac{H}{D} = \sin^2 \frac{\Theta}{4}$ (6)

Безразмерная длина границы раздела фаз – $\frac{a}{D} = \sin \frac{\Theta}{2}$; (7)

Безразмерный смоченный периметр - $\frac{\chi}{\pi D} = \frac{\Theta}{2\pi}$; (8)

Безразмерный гидравлический радиус - $\frac{4R_c}{D} = 1 - \frac{\sin \Theta}{\Theta}$; (9)

Коэффициента заполнения трубы - $\frac{\varpi}{\varpi_o} = \frac{\Theta - \sin \Theta}{2\pi}$. (10)

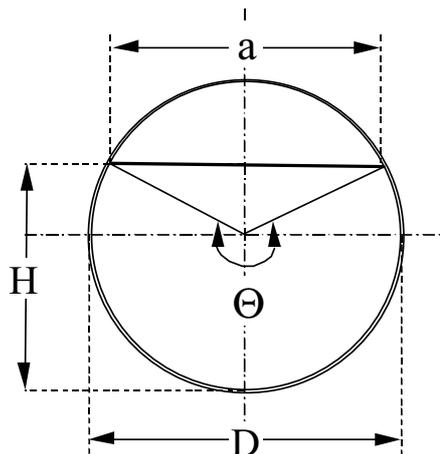


Рис.3 - Геометрические характеристики живого сечения

Раскрывая $(\vartheta+d\vartheta)^2$ как $\vartheta^2+2\vartheta\cdot d\vartheta+(d\vartheta)^2$ в уравнении (1), пренебрегаем $(d\vartheta)^2$ как величиной более высокого порядка малости. После приведения подобных получаем:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{dH}{dx} + \alpha_0 \frac{\vartheta}{g} \frac{d\vartheta}{dx} + 0,08263 \cdot \frac{\lambda}{D^5} \cdot \left(\frac{\varpi_0}{\varpi}\right)^2 \frac{D}{4R_z} \cdot Q^2 \quad (11)$$

Изменение глубины потока и скоростного напора по длине в установившемся движении жидкости может происходить либо при изменении диаметра трубопровода, либо угла его наклона к горизонту. Для элементарного участка трубопровода в рамках предложенной расчетной схемы этих составляющих нет. Решим полученное уравнение относительно коэффициента заполнения:

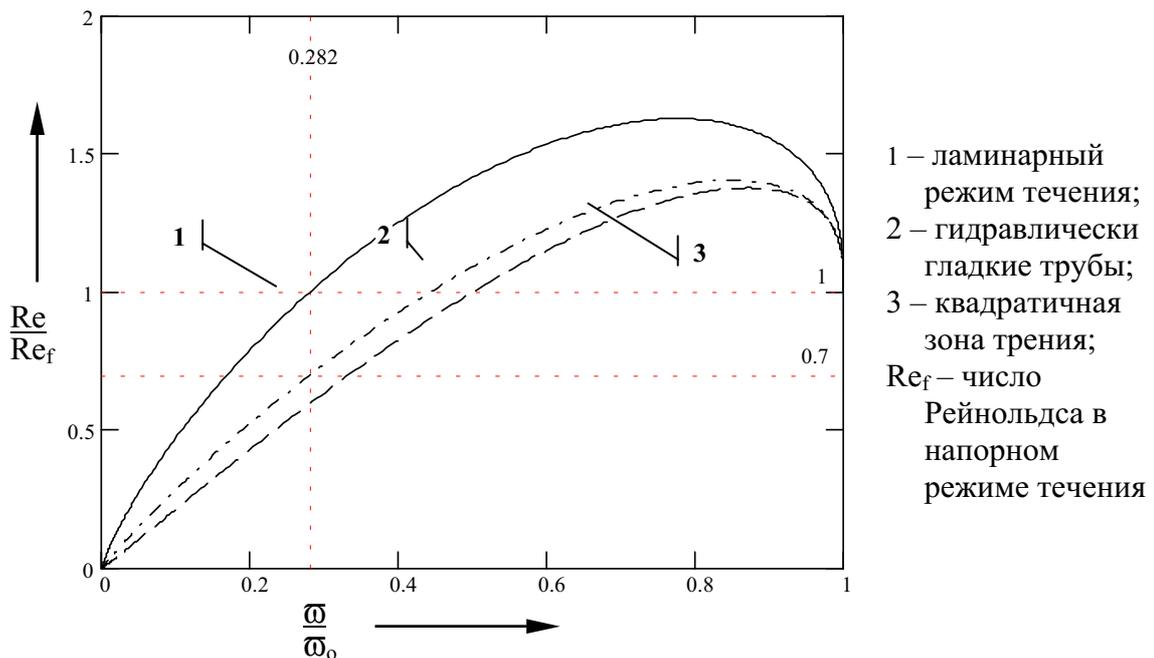
$$\operatorname{tg}\alpha = 0,08263 \cdot \frac{\lambda}{D^5} \cdot \left(\frac{\varpi_0}{\varpi}\right)^2 \frac{D}{4R_z} \cdot Q^2 \quad (12)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления, в свою очередь, определяется режимом трения, который индицируется числом Рейнольдса:

$$\operatorname{Re} = \frac{\vartheta \cdot 4R_z}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \cdot \nu} \cdot \frac{\varpi_0}{\varpi} \cdot \frac{4R_z}{D}, \quad (13)$$

где ν - кинематическая вязкость жидкости.

Однако, при изменении степени заполнения скорость движения жидкости меняется, а, следовательно, может меняться и режим движения жидкости, и зона трения в турбулентном режиме. При малой степени заполнения – ламинарный с последующим переходом в турбулентный, а при определенных условиях и обратно. На рис. 4 изображено изменение числа Рейнольдса в зависимости от коэффициента заполнения и режима течения жидкости.



Отношение $\frac{Re}{Re_f}$ достигает своего максимума:

$$\left. \frac{Re}{Re f} \right|_{\frac{w}{w_0}=0,778} = 1,626 \text{ - в ламинарном режиме течения;}$$

$$\left. \frac{Re}{Re f} \right|_{\frac{w}{w_0}=0,852} = 1,403 \text{ - в зоне гладкого трения;} \quad (14)$$

$$\left. \frac{Re}{Re f} \right|_{\frac{w}{w_0}=0,868} = 1,376 \text{ - в зоне квадратичного трения.}$$

На основании экспериментальных исследований Г.Е.Коробковым [11] были предложены зависимости коэффициента Дарси для безнапорного ламинарного течения:

$$\lambda = \frac{90}{Re} \quad (15)$$

и зоны гладкого трения:

$$\lambda = \frac{0,194}{Re^{0,187}}, \quad (16)$$

погрешность которых не превышает 12%.

Используя формулу Кольбука для зон смешанного и квадратичного трения [6], а так же рекомендации М.В.Лурье для аппроксимации переходного режима «коэффициентом перемежаемости» [10]:

$$\gamma = 1 - \exp\{-0,2 \cdot (\text{Re} - 2320)\}, \quad (17)$$

получим следующий алгоритм для определения коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{90}{\text{Re}}, && \text{для } \text{Re} < 2320; \\ \lambda &= \frac{90}{\text{Re}}(1 - \gamma) + \frac{0,194}{\text{Re}^{0,187}}\gamma, && \text{для } 2320 < \text{Re} < 4000; \\ \lambda &= \frac{0,194}{\text{Re}^{0,187}}, && \text{для } 4000 < \text{Re} < 27 \left(\frac{D}{k_{\text{э}}} \right)^{1,143}; \\ \frac{1}{\sqrt{\lambda}} &= -2 \cdot \lg \left(\frac{k_{\text{э}}}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right), && \text{для } \text{Re} > 27 \left(\frac{D}{k_{\text{э}}} \right)^{1,143}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $k_{\text{э}}$ – коэффициент эквивалентной шероховатости внутренней поверхности трубы.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С целью обобщения и анализа полученного решения введем в рассмотрение расход полным сечением Q_f , под которым будем понимать производительность участка трубопровода в условиях, когда гидравлический уклон равен углу наклона оси к горизонту. Этот режим предполагает течение жидкости под действием только гравитационных сил, а давление по длине участка остается постоянным.

$$Q_f = \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha \cdot D^5}{0,08263 \cdot \lambda_f}}, \quad (19)$$

где λ_f – коэффициент гидравлических сопротивлений определяется по классической методике:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}, \quad \text{для } \text{Re} < 2320; \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{k_s}{3,7D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right), \text{ для } \text{Re} > 2320.$$

Таким образом, расход полным сечением учитывает и угол наклона участка к горизонту, и реологические свойства перекачиваемой среды.

На графике 7 изображены кривые зависимостей относительной производительности участка трубопровода $\frac{Q}{Q_f}$ от его степени заполнения $\frac{\varpi}{\varpi_0}$ при различных исходах смен режимов.

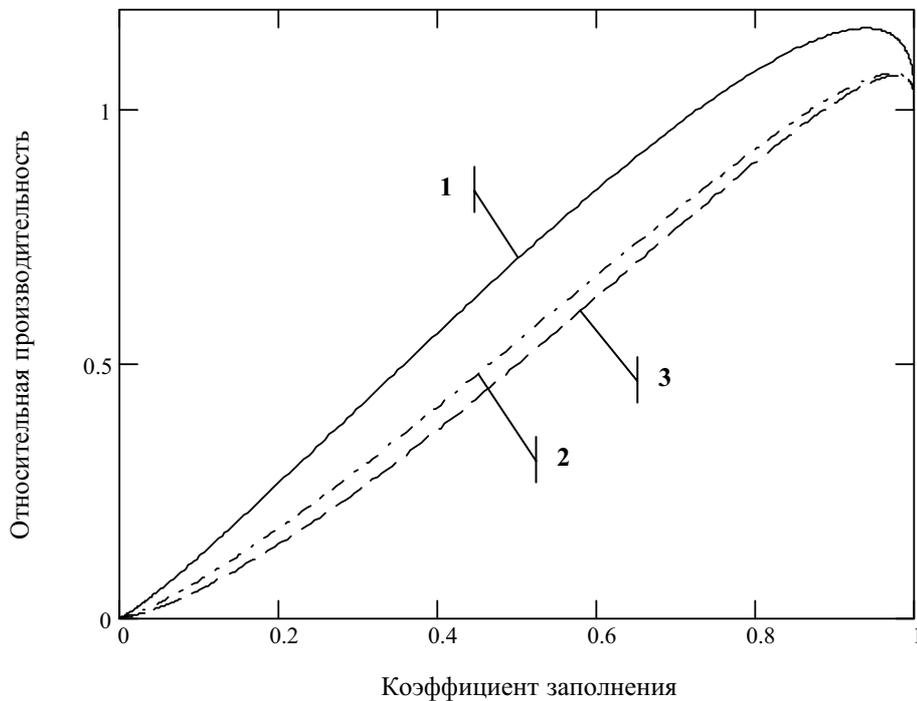


Рис.5 – Производительность участка трубопровода в зависимости от коэффициента его заполнения

- 1 – ламинарный режим течения жидкости;
- 2 – турбулентный режим течения жидкости в зоне гладкого трения;
- 3 – зона трения квадратичная во всем диапазоне коэффициента заполнения.

Хотя тенденция аналогична и на графиках во всех случаях наблюдается точка максимума, но его величина и значение коэффициента заполнения, при котором максимум наблюдается различны.

Относительную производительность можно определить из выражения:

$$\frac{Q}{Q_f} = \frac{\varpi}{\varpi_0} \sqrt{\frac{\lambda_f 4R_z}{\lambda D}} \quad (21)$$

Учитывая выражения через центральный угол Θ безразмерного гидравлического радиуса (9) и коэффициента заполнения (10), а так же уравнения для определения коэффициентов гидравлического сопротивления λ (18), можно получить аналитические зависимости для относительной производительности в диапазоне центральных углов Θ в пределах одной зоны трения:

$$\frac{Q}{Q_f} = 0,3989 \frac{(\Theta - \sin \Theta)^{3/2}}{\Theta}, \quad \text{для ламинарного режима}$$

течения;

$$\frac{Q}{Q_f} = 0,2003 \frac{(\Theta - \sin \Theta)^{3/2}}{\Theta^{3/8}}, \quad \text{для зоны гладкого трения; (22)}$$

$$\frac{Q}{Q_f} = 0,1591 \frac{(\Theta - \sin \Theta)^{13/8}}{\Theta^{5/8}}, \quad \text{для зоны квадратичного трения.}$$

Численное решение этих уравнений дает следующие значения максимумов:

$$\left(\frac{Q}{Q_f} \right)_{\max} \Big|_{\Theta=4,91} = 1,161 - \text{для ламинарного течения;}$$

$$\left(\frac{Q}{Q_f} \right)_{\max} \Big|_{\Theta=5,25} = 1,073 - \text{для гидравлически гладких труб; (23)}$$

$$\left(\frac{Q}{Q_f} \right)_{\max} \Big|_{\Theta=5,29} = 1,069 - \text{для квадратичной зоны трения.}$$

Изменение степени заполнения в зависимости от угла наклона участка трубопровода \varnothing 1200 мм для различных режимов течения жидкости вязкостью 1 сСт в диапазоне расходов $[10^{-4} \dots 10^3 \text{ м}^3/\text{с}]$ изображено на рис. 6.

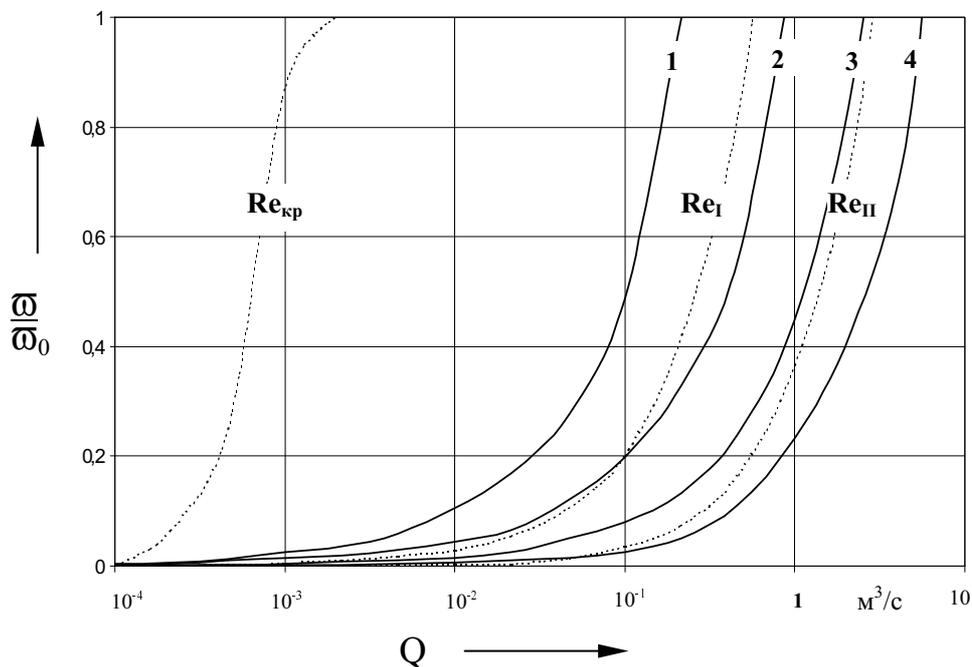


Рис.6 – Степень заполнения трубопровода в зависимости от производительности
 1 - $\text{tg}\alpha = 10^{-4}$; 2 - $\text{tg}\alpha = 10^{-3}$; 3 - $\text{tg}\alpha = 10^{-2}$; 4 - $\text{tg}\alpha = 10^{-1}$.

Кривые заполнения получены из уравнений (22) $Q = f(\Theta) \cdot Q_f$ для соответствующих режимов течения. Границы зон трения определяются формулами:

$$Q = \frac{Re \cdot D \cdot v \cdot \Theta}{8}, \quad (24)$$

где $Re = Re_{кр}$ для разграничения зоны ламинарного течения жидкости и гидравлически гладких труб;

$Re = Re_I$ – зон гладкого и смешанного трения;

$Re = Re_{II}$ – зон смешанного и квадратичного трения.

Таким образом, необходимым (но не достаточным) условием существования газоздушного скопления на участке трубопровода является соотношение:

$$Q < Q_{max}, \quad (25)$$

где Q – мгновенная производительность трубопровода;

Q_{max} – максимально возможная производительность участка в безнапорном режиме его эксплуатации.

ВЫВОД

Положение газоздушного скопления в полости трубопровода обусловлено гидродинамическими условиями:

- скопление располагается на нисходящем участке трассы, начиная с наивысшей (перевальной) точки;
- необходимым условием существования скопления является поддержание производительности в пределах $Q = [0 \dots Q_{\max}]$;
- площадь поперечного сечения скопления на каждом участке трубопровода регламентируется его коэффициентом заполнения $\frac{\varpi}{\varpi_0}$;
- Длина газового скопления определяется наличием газа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Донец К.Г. Исследование работы нефтепродуктопроводов в период разрыва сплошности потока у перевала. (канд.дисс.) - М.:МИНХ и ГП, 1965.
2. Kalinske A.A., Robertson I.M. Entrapment of air in flowing water //Transactions American Society of Civil Engineers. – vol. 108, 1943. – p.p. 1435-1450.
3. Маслов Л.С. Удаление воды и воздуха из трубопроводов в пусковой период //Строительство трубопроводов. – 1965, № 9.
4. Бахметьев Б.А. О равномерном движении жидкости в каналах и трубах. – Л.,1931.
5. Чугаев Р.Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости). Издание 4-е. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
6. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
7. Munson B.R., Young D.F., Okiishi T.H. Fundamentals of Fluid Mechanics. (Second Edition). – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1994. - 893 p.
8. Гужов А.И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. – М.: Недра, 1973. – 280 с.
9. Teitel Y., Dukler A.E., Barnea D. Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. //AIChE J., Vol. 26,1980. – pp.345-354.
10. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов. /И.Т.Ишмухаметов, С.Л.Исаев, М.В.Лурье, С.П.Макаров. – М.: Нефть и газ, 1999 . – 300 с.
11. Коробков Г.Е. Движение нефтей и нефтепродуктов в трубопроводах незаполненным сечением. (дисс.канд.техн.наук) – Уфа, 1971. – 167 с.